

УДК 553.411.071.242.4+550.4

## ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ РУДОВМЕЩАЮЩЕГО МЕТАСОМАТИЧЕСКОГО ОРЕОЛА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (Патомское нагорье)

И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко\*, А.В. Верхозин\*

Томский политехнический университет

E-mail: kucherenko@ru.ru

\*ООО «Ленская золоторудная компания», г. Бодайбо

E-mail: VerkhazinAV@polyusgold.com

*Статья продолжает цикл публикаций, содержащих петролого-геохимические свидетельства геолого-генетической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черносланцевом и несланцевом (кристаллическом) субстрате. На примере нового вводимого в эксплуатацию месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) «черносланцевого типа» показано строение, минеральный состав и геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола. Полученные дополнительные результаты вписываются в разработанную систему доказательств геолого-генетической однородности месторождений той и другой совокупности и подтверждают ранее выявленные закономерности, следующие из реконструкции геологической истории металлов в блоках метасоматизма и рудообразования.*

### Введение

Во вмещающих рудные тела породах гидротермальных золоторудных полей, образованных в кристаллическом субстрате и в толщах углеродистых сланцев осадочных бассейнов, происхождение наблюдаемых повышенных или даже высоких, до граммов в тонне породы, содержаний золота оценивается, как известно, различно. В первом случае накопление его в околорудном (межрудном) пространстве связывают с рудообразованием и синрудный статус геохимических ореолов рассеяния (аномалий), как-будто, ни у кого не вызывает сомнений. В черносланцевых толщах реконструкция условий формирования современного геохимического облика пород сопряжена с трудностями, обусловленными особенностями их происхождения и обычных для них последующих преобразований. В отличие, скажем, от изверженных plutонических пород с кларковыми содержаниями металлов, сохраняющимися до начала рудообразования, осадочным породам присущи более широкие против кларков региональные вариации содержаний, в частности, золота, а перераспределение его допускается или декларируется на последующих дорудных этапах регионального, в том числе очагово-купольного, зонального метаморфизма. Существующие до сего времени разногласия выражаются в оценке дорудных его содержаний от первых мг/т до нескольких г/т в одних и тех же породах одного района в работах разных лет одного и разных авторов [1]. Цена решения вопроса высока в теоретическом и прикладном аспектах. В последнем случае следствием признания высоких содержаний металла в околорудном пространстве месторождений дорудными и в качестве обязательного условия, предпосылки рудообразования будет основанный на этом прогнозно-поисковый критерий, означающий перспективность только тех площадей, на которых содержания золота в породах повышены против кларка на дорудных этапах.

Причины разногласий и многовариантных результатов обсуждались в [1, 2]. В частности, приво-

дились следующие соображения. Чтобы последовательно получать и накапливать достоверное знание об условиях формирования того или иного геохимического облика углеродистых сланцев (как и других пород), в том числе в золоторудных полях, необходимо прежде всего понять, что практикуемые в течение десятилетий методы геохимических исследований с учетом полученных результатов следует квалифицировать как не адекватные цели геохимии, по В.И. Вернадскому, — науки, призванной реконструировать геологическую историю химических элементов в земной коре и слагающих ее породах. Оценивается конечный результат — параметры распределения металлов в породах в достигнутом на данное время их составе. Как реагировали металлы на этапах изменений, — остается неясным или декларируется при отсутствии содержательных аргументов. Примеры известны и многочисленны [3–5 и др.], некоторые приведены в [1, 2].

Требуются другие подходы и другие методы. Предложенный альтернативный подход [6] опирается на положение, согласно которому геологическая история химических элементов неотделима от геологической истории содержащих их горных пород. Поскольку преобразования пород на каждом этапе овеществлены в составе минеральных ассоциаций (комплексов), как правило, поддающихся идентификации с соответствующими процессами, постольку открываются возможности для формирования многоуровневой системы геохимических выборок. Каждый уровень отвечает этапу образования пород и соответствующему этапу их преобразований. Это, в свою очередь, обеспечивает оценку параметров распределения металлов в исходных породах, если они сохранились (нижний уровень), и в измененных породах на каждом этапе (средний и верхний уровни), то есть проследить эволюцию распределения металлов вплоть до завершающего этапа их преобразований. Методика трудоемка и предполагает выполнение комплексных петролого-геохимических исследований с предшествующей формированию геохимических

выборки диагностикой видовой принадлежности пород, состава, последовательности образования и обусловленности сменяемыми один другой геологическими процессами наложенных минеральных комплексов, отвечающих каждому уровню.

Многолетняя реализация предложенной методики обеспечила получение результатов, повторяющихся в ряде мезотермальных золоторудных полей в разнообразном, включая черносланцевый, исходном субстрате и характеризующих картину распределения рудогенных элементов в околорудном, междурудном пространстве с генетической интерпретацией наблюдаемых содержаний металлов, в том числе аномальных [1, 2, 6 и др.]. Вместе с тем, фактологическая база выявленных закономерностей далека от наполнения и целесообразно дальнейшее накопление эмпирических данных, наиболее полно раскрывающих все возможное разнообразие структуры (зональности) околорудных геохимических полей гидротермальных золоторудных, как, впрочем, и других, месторождений, равно как условий и причин такого разнообразия, если оно будет установлено.

В статье приведены результаты петролого-геохимического исследования черносланцевой толщи, вмещающей золотое месторождение Чертово Корыто. Новые данные характеризуют структуру околорудных метасоматического и геохимического ореолов, их причинно-следственные соотношения между собой и с рудами. Результаты обсуждаются в контексте выявленных ранее закономерностей.

### 1. Методика исследования

Месторождение детально разведано вертикальными колонковыми скважинами по сети 50×50 м глубиной до 250 м. Изучен и опробован керн скважин по 4 поперечным к простиранию рудной залежи профилям — двум в ее центральной части и по одному — на противоположных ее окончаниях. Благодаря этому установлено внутреннее строение рудовмещающего блока во всем его объеме, — форма рудного тела и соотношение его со слоистостью осадочной толщи, объемная модель рудовмещающего зонального метасоматического ореола, структура геохимического ореола и соотношение его с метасоматическим ореолом и с рудами. Штуфные геохимические пробы массой до 0,5 кг, не содержащие жил и прожилков кварца, представляют осадочные породы по видам и по принадлежности к минеральным зонам метасоматического ореола. Это исключает эффект сглаживания параметров распределения рудогенных элементов, прежде всего дисперсии содержаний, напротив, — обеспечивает максимальное приближение их к реальному распределению в породе каждого вида. Последнее важно для генетической интерпретации наблюдений. Промежуточный уровень эшелонированной системы геохимических выборок отсутствует в связи с тем, что месторождение залегает в одной мине-

ральной зоне регионального метаморфизма, предшествовавшего рудообразованию.

Из каждой истертой до пудры с необходимыми предосторожностями пробы отбирались навески для определения Au, Ag, Hg, цветных металлов. Все анализы выполнялись в лицензированных и аккредитованных лабораториях. Золото и серебро определялось методом атомной абсорбции с чувствительностью 0,1 мг/т в лаборатории геохимии редких и благородных металлов Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) аналитиком В.Г. Цимбалест. Выполнены контрольные анализы. По данным внутреннего контроля тем же методом (15 % проб) средняя относительная ошибка по разностям двойных измерений Au и Ag в интервале содержаний 0,5...10 мг/т не превысила 23 % (Au) и 14 % (Ag), в интервале содержаний 10,1...100 мг/т — 26 % (Au) и 13 % (Ag) [2]. По данным внешнего контроля (10 % проб) та же ошибка и для тех же интервалов содержаний Au составила соответственно 51 и 61 % (пара химико-спектральный — атомно-абсорбционный методы), для интервала содержаний Au 0,5...10 мг/т — 23 % (пара нейтронно-активационный — атомно-абсорбционный методы). Содержание ртути определялось методом атомной абсорбции с чувствительностью 5 мг/т в лаборатории ФГУП «Березовгеология» (г. Новосибирск) аналитиком Н.А. Чариковым, цветных металлов — приближенно-количественным эмиссионным спектральным методом в лаборатории Бодайбинской экспедиции. Все расчеты статистических параметров распределения металлов в породах выполнены Р.Ю. Гавриловым.

Содержание некарбонатного углерода в породах определялось аналитиком Т.С. Хаменковой в лаборатории инструментальных методов исследования центра аналитических исследований ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск.

### 2. Краткий очерк геологического строения месторождения Чертово Корыто

Месторождение в составе Артемьевского золоторудного поля Кевактинского рудного узла расположено на севере Патомского нагорья в бассейне р. Б. Патом — правого притока р. Лены в среднем ее течении (рис. 1). Оно залегает в раннепротерозойской толще углеродистых терригенных сланцев Михайловской свиты мощностью до 1200 м, образующей пологую синклинальную складку широтного простирания с размахом крыльев до многих км — Михайловскую синклиналь, сохранившуюся от эрозии в призмковой части. Сравнительно простая складчатая структура местами осложнена резкими изгибами слоев — брахиформами или флексурами. Одна из таких брахиформ образует локальное восточное замыкание на периферии месторождения (рис. 2). Здесь свойственное толще падение слоев на юг под углами до 10...20° изменяется на пологое западное.

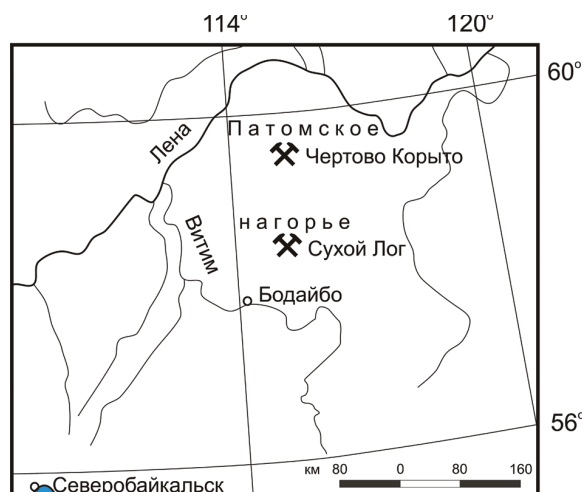


Рис. 1. Схема расположения месторождения Чертово Корыто

Крупная рудная залежь месторождения приурочена к складчато-разломной зоне северо-северо-западного ( $350^\circ$ ) простирания, в которой крутопадающий ( $60^\circ$ ) на запад-юго-запад взброс оперяет Амандракский глубинный разлом и сочетается висячем боку с оперяющей его мощной погружающейся в том же направлении под углами до  $20^\circ$  зонной разуплотнения пород. Зона разуплотнения вмещает сульфидно-кварцевую минерализацию и постепенно, на расстоянии до нескольких сотен метров от места выхода на дневную поверхность выклинивается на западе. У рудной залежи отсутствуют геологические границы, — контуры ее определяются по данным непрерывного опробования. В центральной части месторождения залежь согласна стратификации, на северной половине контуры ее секут стратификацию под острыми углами.

Рудовмещающая толща в верхах михайловской свиты сложена слоями ритмично чередующихся мелкозернистых, разномзернистых, от тонко- до крупнозернистых метапесчаников, метаалевролитов, аргиллитов; доля последних не превышает 6...7 об. %. Обычны «усеченные» ритмы в составе метапесчаников и метаалевролитов, не завершающиеся аргиллитами. Сортировка обломочной фракции слабая. В разрезе отложений участвуют слои серых массивных песчаников мощностью до нескольких десятков метров; обычная мощность слоев, как правило, не превышает десятков сантиметров — первых метров. О неспокойных гидродинамических режимах седиментации свидетельствуют обычная в метапесчаниках и метаалевролитах перекрестно-волнистая, косая слойчатость, уплощенные обломки (гальки) аргиллитов в песчаниках, текстуры оползания осадков (рис. 3). Вместе с тем, на поверхностях отдельности слоев отсутствуют знаки ряби, трещины усыхания. В обломочной фракции, занимающей до 50...90 об. %, резко преобладают в разной степени, в том числе слабо окатанные, угловатые обломки кварца при подчиненном (до 20 об. %) участии полевых шпатов. Цемент серицитовый, первоначально, очевидно, глинистый базальный, контактово-поровый, контактовый. По совокупности при-

знаков предполагается образование осадочной толщи в условиях прибрежно-морского мелководья в области верхнего шельфа.

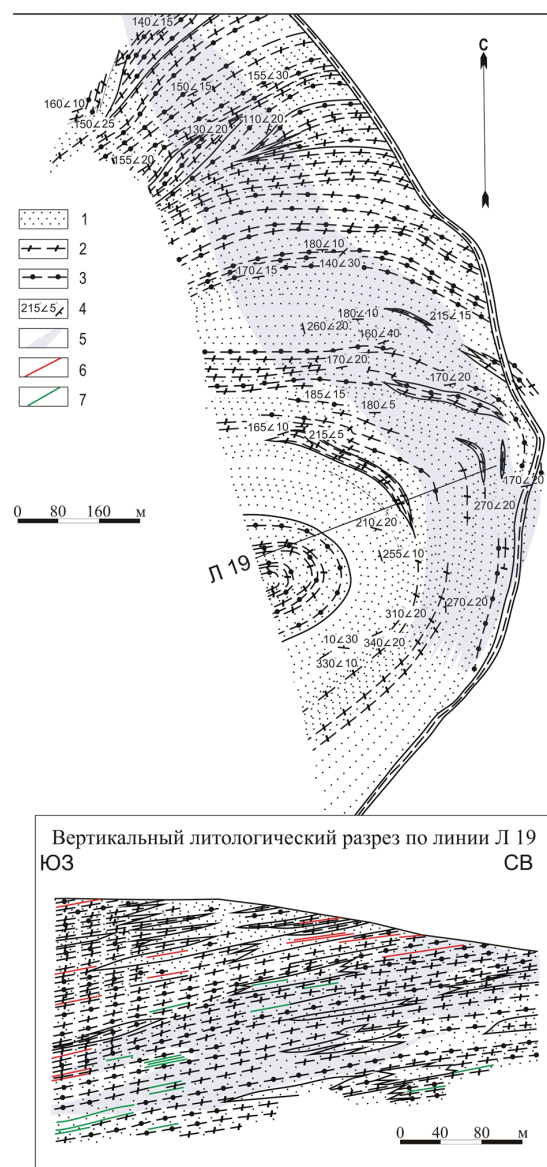
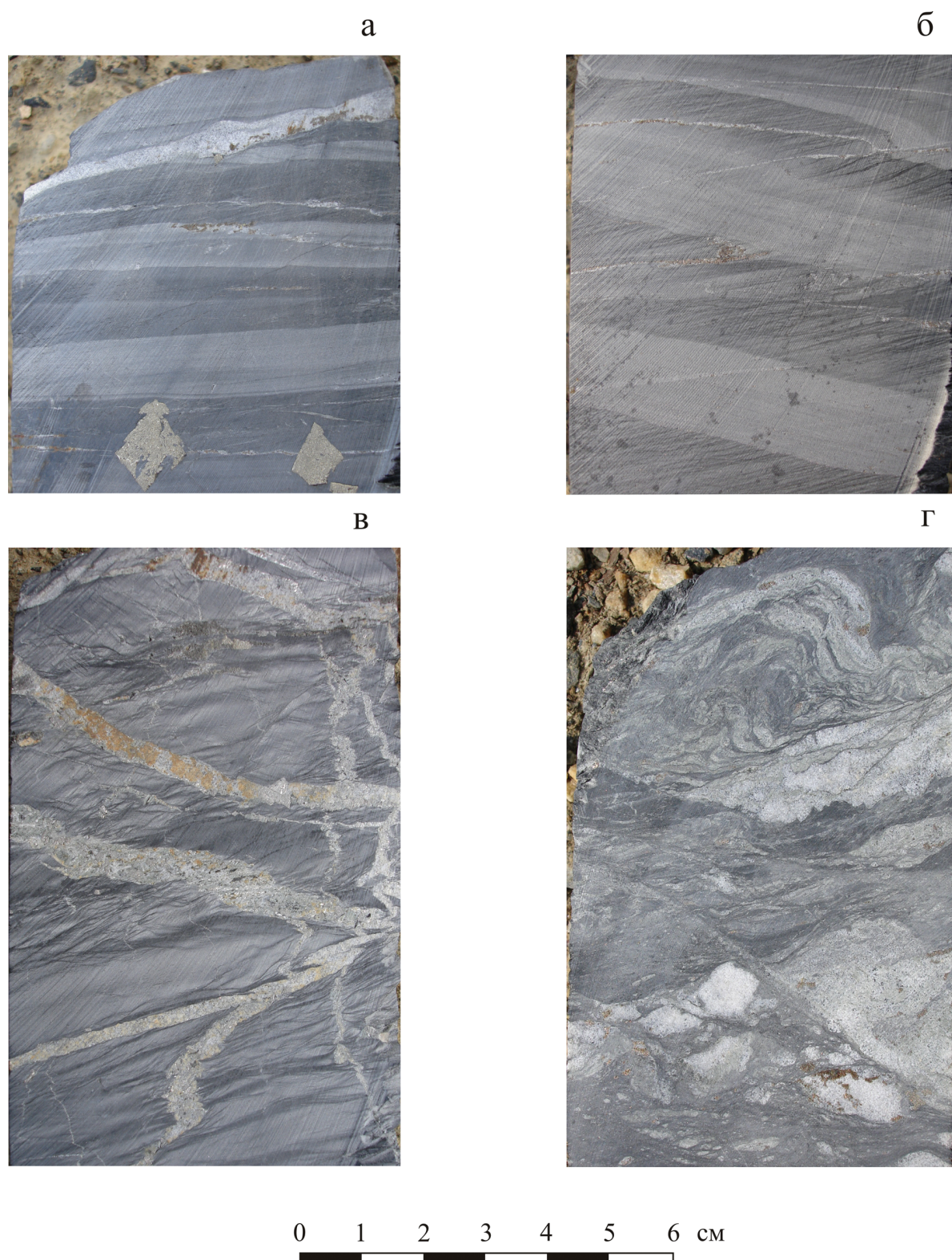


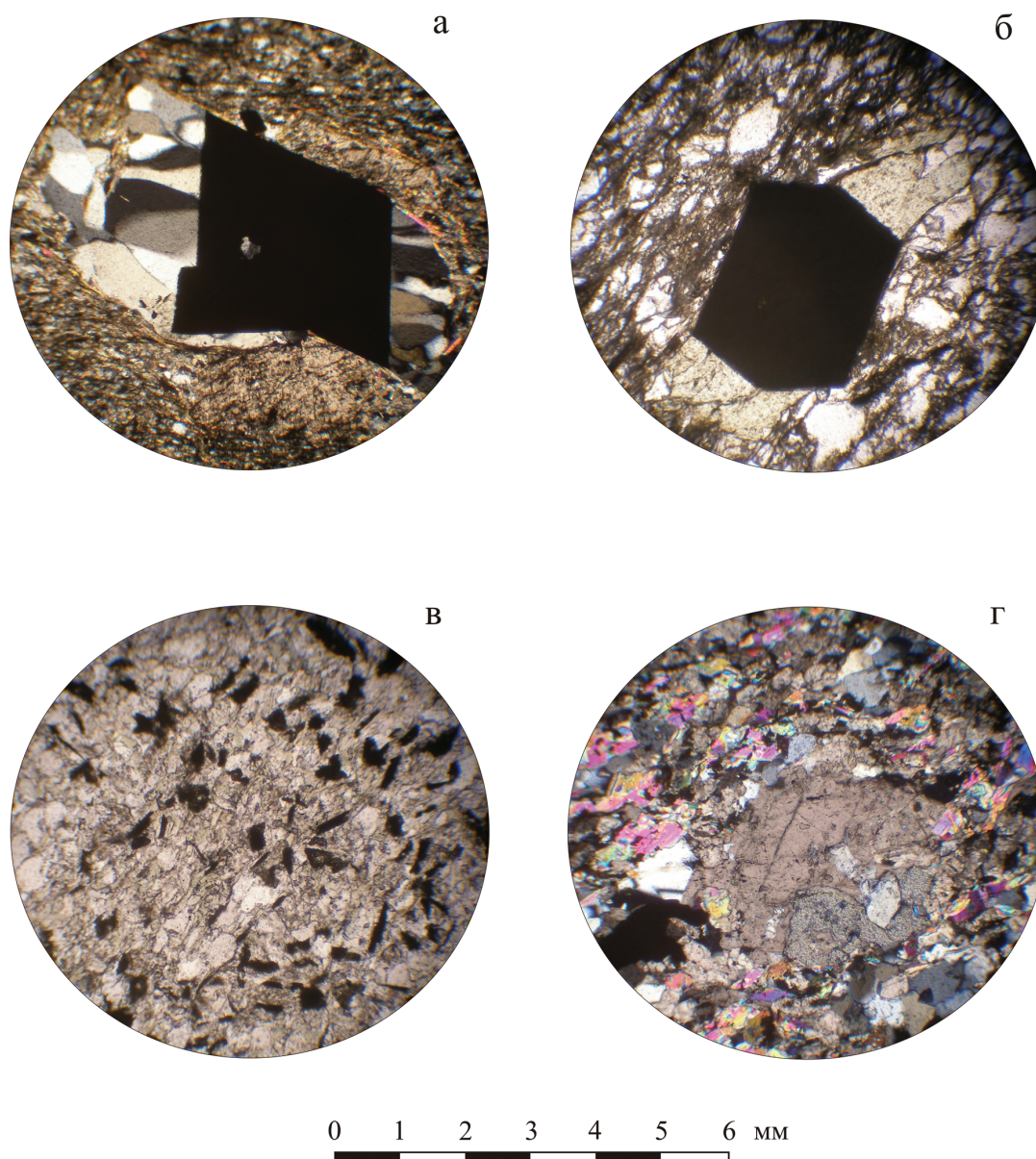
Рис. 2. Схема геологического строения месторождения Чертово Корыто: 1) как правило, плохо отсортированные серые до темно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослойчатые полевошпат-кварцевые песчаники, алевро-песчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2) как правило, плохо отсортированные темно-серые разномзернистые, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослойчатых полевошпат-кварцевые алевролиты, песчаные алевролиты, углеродистые и безуглеродистые; 3) аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об. %) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и/или алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; 4) азимут и угол падения слоев; 5) область сульфидной минерализации; 6) зоны тонкого расщепления и дробления пород; 7) тыловые зоны (хлоритовая, альбитовая, березитовая) рудовмещающего метасоматического ореола





**Рис. 3.** Горизонтальная (а), косая (б), перекрестно-волнистая (в) слоистость в алевро-песчаных пачках. Темные алевролитовые слойки в серых песчаниках обогащены керогеном. Текстура оползания осадков, подчеркиваемая унаследованной на этапе рудообразования причудливой конфигурацией карбонатно-сульфидно-кварцевых прожилков (г). Морфология карбонатно-сульфидно-кварцевых прожилков, выполняющих трещины отрыва (в)





**Рис. 4.** Углеродистая минеральная зона рудовмещающего метасоматического ореола, алевролит (а), песчаник (б). Метакристаллы арсенопирита в обрамлении пламенивидных выделений кварца (а, с анализатором), чешуек хлорита (б, без анализатора). Березитовая минеральная зона рудовмещающего метасоматического ореола, березит (в,г). Многочисленные включения лейкоксена (в, без анализатора), метакристалл анкерита (г, с анализатором)

Все породы, кроме березитов, неравномерно обогащены керогеном (табл. 1), по заключению (устное сообщение) аналитика Западно-Сибирского испытательного центра (г. Новокузнецк) Г.М. Тиракова – с неупорядоченной структурой, отвечающим по составу переходу от антрацита до кокса. Кероген нередко слагает секущие слоистость прожилки мощностью до 5 см.

Породы содержат редкую равномерно рассеянную примесь кристаллов амфибола (жедрита), полихромного турмалина, пластинки мусковита и бурого биотита, то есть подверглись региональному метаморфизму, отвечающему начальным изменениям эпидот-амфиболитовой фации. Вместе с тем, в них сохранились минеральный состав обломочной

фракции, текстуры и структуры этапа седиментации.

Метаморфизованные осадочные породы в рудной залежи и во вмещающей ее толще на этапе рудообразования подверглись метасоматическим изменениям. Множество субгоризонтальных маркирующих трещины отрыва и межслоевые швы отдельности и расщепления кварцевых жил мощностью до 4,5 м сочетаются в залежи с разноориентированными сложными по конфигурации прожилками (рис. 3) и системами субпараллельных согласных слоистости микропрожилков кварца и сульфидов. Основная масса сульфидов образована в форме вкрапленников в метасоматитах. Преобладают пирит, пирротин, арсенопирит, в качестве незначительной примеси в сульфидно-кварцевых

комплексах участвуют галенит, сфалерит, халькопирит, микропримеси с размером зерен до нескольких десятков мкм — кобальтин, самородный свинец, ульманит, теллуrowисмутин, валлериит. Преобладает свободное золото в кварце. По данным изучения вакуолей в кварце руды образованы в температурном диапазоне 50...490 °С.

**Таблица 1.** Содержание некарбонатного углерода в породах михайловской свиты

Номер пробы	Массовая доля углерода некарбонатного в породе, % $\pm \Delta$ (%) при $p=0,95$	Название породы
71–84,9	0,32 $\pm$ 0,02	Металесчаник
85–148,8	0,23 $\pm$ 0,01	
86–20,3	0,17 $\pm$ 0,01	
86–110,7	0,29 $\pm$ 0,02	
192–197,0	0,34 $\pm$ 0,02	
192–217,5	0,33 $\pm$ 0,02	
341–48,9	0,07 $\pm$ 0,02	Металесчаник
86–33,3	0,26 $\pm$ 0,02	
86–67,6	0,20 $\pm$ 0,02	Металесчаник
341–45,8	0,13 $\pm$ 0,01	
409–183,4	0,23 $\pm$ 0,01	
409–198,3	0,09 $\pm$ 0,02	
305–121,2	1,58 $\pm$ 0,06	Металесчаник в контакте с аргиллитом
409–21,5	0,39 $\pm$ 0,02	
71–78,7	0,91 $\pm$ 0,05	Аргиллит
71–87,0	0,22 $\pm$ 0,01	
86–41,6	0,53 $\pm$ 0,03	
192–111,0	0,69 $\pm$ 0,04	
192–225,3	1,10 $\pm$ 0,04	
305–39,3	1,90 $\pm$ 0,08	Березит
86–28,7	0,02	
86–66,2	0,02	

### 3. Минеральная зональность рудовмещающего метасоматического ореола

Распределение минеральных ассоциаций этапа метасоматизма и рудообразования в крупнообъемном метасоматическом ореоле месторождения подчиняется определенному порядку минеральной зональности (подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловой зоне).

**Внешняя зона:** кварц + серицит + лейкоксен + рутил + сульфиды + кальцит + анкерит + альбит + актинолит + хлорит + кероген + биотит;

**Углеродистая зона:** кварц + серицит + лейкоксен + рутил + сульфиды + золото + кальцит + анкерит + альбит + актинолит + хлорит + кероген;

**Хлоритовая зона:** кварц + серицит + лейкоксен + рутил + сульфиды + золото + кальцит + анкерит + альбит + актинолит + хлорит (рипидолит);

**Альбитовая зона:** кварц + серицит + лейкоксен + рутил + сульфиды + золото + Мп-кальцит + анкерит + альбит;

**Тыловая (березитовая) зона:** кварц + серицит + лейкоксен + рутил + сульфиды + золото + Мп-кальцит + анкерит.

Золотоносные кварцевые жилы и прожилки не образуют осевую зону, которая характерна для жильных месторождений в кристаллическом субстрате, а расположены преимущественно среди черных пород углеродистой зоны и не сопровождаются в альбандах признаками усиления околожильных изменений.

Основной объем ореола сложен черными, темно-серыми, серыми породами углеродистой зоны. Внутренняя граница внешней зоны фиксируется по полному растворению биотита на дальней западной окраине ореола. Породы трех тыловых зон имеют массивное сложение и, обедненные керогеном, осветлены до зеленовато-серого цвета в хлоритовой и светло-серого — в альбитовой и березитовой зонах. Тыловые зоны рассредоточены во всем объеме промежуточной углеродистой зоны, приурочены преобладающе к субгоризонтальным межслоевым швам рудовмещающей толщи (рис. 2), имеют несопоставимо меньшие сравнительно с углеродистой зоной мощности. Последние уменьшаются от хлоритовой зоны (многие метры) к альбитовой (десятки см) и далее к березитовой (первые — многие см).

Смена минеральных зон обусловлена растворением, как правило, одного минерала. Исчезновению каждого минерала сопутствует нарастание его концентрации в направлении к внутренней границе содержащей его минеральной зоны. Этот факт согласуется с общим, включая сульфиды, нарастанием объема минеральных новообразований вблизи внутренней границы каждой зоны, а все это в совокупности доказывает образование обсуждаемых минеральных ассоциаций в процессе и вследствие предрудного и рудосопровождающего метасоматизма.

Следующие реакции минеральных замещений квалифицированы как ключевые в создании метасоматического ореола месторождения.

Биотит замещается хлоритом (рипидолитом), последний — серицитом, конечным продуктом реакций, содержащим незначительные примеси лейкоксена и рутила, образованные вследствие высвобождения титана из исходного минерала. Своей «загрязненностью» титановыми минералами серицит отличается от чистых микропластинок мусковита модификации 2M<sub>1</sub>, образованного на этапе предшествующего метаморфизма в парагенезисе с биотитом. Масса хлорита, а, следовательно, и серицита определяется массой метаморфического биотита, то есть дометаморфического глинистого цемента — носителя необходимого для образования биотита калия. В песчаниках она минимальна в соответствии с



дефицитом тонкодисперсного глинистого цемента, в составе которого много кварца. В аргиллитах она максимальна — породы почти нацело сложены ориентированными чешуйками серицита. О том, что серицит наследует при посредничестве хлорита биотит, сомневаться не приходится, поскольку только он в глинистых породах мог служить источником значительной массы калия, необходимого для образования минерала, слагающего после метасоматизма породу почти на 100 %. Промежуточный минерал хлорит в аргиллитах нередко частично сохраняется в виде реликтовых скоплений в массе серицита.

Метасоматический кварц в углеродистой зоне образует микролинзы с вкрапленниками сульфидов или каемки пламенивидной формы вокруг агрегатов или кристаллов последних (рис. 4). Из пород тыловых зон, содержащих до многих десятков % карбонаты, в основном анкерит, в сопоставимых объемах посредством растворения кварца кремнезем удален и кварц теряет статус ведущего минерала и становится второстепенным или даже примесью. Это явление существенной замены кварца и полевых шпатов карбонатами начинает проявляться в хлоритовой и усиливается в березитовой зонах.

Полевые шпаты во внешней и углеродистой зонах отличаются высокой степенью сохранности. Незначительное, даже исчезающе малое количество альбита здесь определяется незначительным содержанием полевых шпатов в обломочной фракции и цементе исходных пород. В тыловых зонах плагиоклазы замещаются альбитом интенсивнее, но и сам альбит в березитовой зоне растворяется почти полностью.

В отличие от пород углеродистой зоны метасоматиты трех тыловых зон утратили цементно-обломочное строение бывших осадочных пород. Это мелко-, среднезернистые (до 0,5 мм) лепидогранобластовые, порфиробластовые (до 5 мм в поперечнике) агрегаты преобладающих (до 20...30 об. % в хлоритовой, до 70 об. % в березитовой зонах) кристаллов-ромбоэдров, зерен, сростков зерен анкерита с незначительной примесью Mn-кальцита (по данным термического анализа), зерен и сростков зерен с торцевой структурой кварца, скоплений чешуек рипидолита (в хлоритовой зоне) и серицита во всех зонах. Вариации количественных соотношений каждого из перечисленных минералов укладываются в несколько десятков об. %. Породы содержат обильные микропризмы апатита, иголки рутила, скопления лейкоксена (рис. 4).

Светлые цвета метасоматитов тыловых зон обусловлены «сжиганием», возможно отгонкой керогена в смежную углеродистую зону, где он концентрируется в породах и прожилках.

#### **4. Распределение рудогенных элементов в метасоматическом ореоле**

Распределение металлов в породах не согласуется с нормальным законом, но не противоречит логнормальному.

Низкие содержания золота и серебра (2,2...4,1 и 39,1...65,3 мг/т) зафиксированы в слабо измененных (до 10 % новообразованных минералов) разномасштабных, мелко-, мелкозернистых песчаниках, алевролитах, аргиллитах, опробованных во внешней зоне и на дальней западной окраине углеродистой зоны метасоматического ореола в керне скважин №№ 341 и 409 (табл. 2). Здесь же отмечены относительно невысокие вариации содержаний металлов, исключая тонко-, мелкозернистые песчаники. Во всех породах содержания обоих металлов и дисперсии их распределения в основной рудовмещающей углеродистой зоне возрастают и достигают максимальных значений в тыловых зонах. Подобное распределение мышьяка выражено менее контрастно, — содержания его, минимальные в слабо измененных породах, всегда возрастают в объеме углеродистой зоны и иногда до значений, сопоставимых с таковыми в тыловых зонах. Содержания никеля и показатели неравномерности его распределения сходны в слабо измененных породах и в объеме углеродистой зоны, но заметно возрастают в локальных тыловых зонах. Увеличены или близки содержания ртути и дисперсии её распределения в объеме углеродистой зоны сравнительно со слабо измененными породами, однако в тыловых зонах обозначились заметно пониженные её содержания при отчасти, в хлоритовой зоне, увеличенной дисперсии её распределения. Пониженное содержание меди при сохранении степени неравномерности её распределения свойственны метасоматитам тыловых зон сравнительно с промежуточной углеродистой и внешней зонами, где параметры её распределения во всех породах близки. В полном разрезе ореола и во всех породах характерно однообразное равномерное распределение свинца, цинка, кобальта, а также висмута, вольфрама и других металлов из числа 28 элементов, содержания которых анализировались.

Корреляционные связи между металлами редко достигают значимых значений. Наиболее часто, но на невысоком положительном уровне они отмечаются в рудовмещающей углеродистой зоне для Au и Ag, Au и As. В остальных случаях их следует считать эпизодическими.

Установлена резкая дифференциация в разрезе ореола Au/Ag- и Au/Hg-отношений, — на фоне невысоких более или менее однообразных их значений в углеродистой зоне они существенно возрастают в тыловых зонах.

Специфика рудного тела, а это, напомним, мощная почти горизонтально залегающая минерализованная зона разуплотнения пород, и буровая система разведки с выходом скважин в подрудное пространство обеспечили возможность оценить изменение параметров распределения металлов на разных гипсометрических уровнях месторождения — подрудном, рудном, надрудном (табл. 3).

Рудный уровень сравнительно с подрудным и надрудным отличается существенным повышением содержаний золота, серебра, мышьяка, никеля и степени неравномерности их распределения. Здесь же усили-

**Таблица 2.** Оценка параметров распределения рудогенных элементов и корреляционных связей золота с рудогенными элементами в минеральных зонах рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Чертово Кoryто

Элементы	Параметры распределения	Исходные породы и минеральные зоны (число проб)								Хлоритовая (39)	Березитовая (18)
		Разнозернистые песчаники		Тонко-, мелкозернистые песчаники		Алевриты		Аргиллиты			
		Углеродистая									
		Скважина № 409 (9)	Вся зона (58)	Скважина № 409 (16)	Вся зона (94)	Скважина № 409 (5)	Вся зона (24)	Скважина № 409 (5)	Вся зона (23)		
Au	$\bar{x}(\bar{x})$	2,2(2,3)	7,3(60,7)	4,1(43,6)	7,7(37,5)	2,9(8,2)	5,6(22,8)	2,6(2,9)	5,1(12,4)	16,0(82,7)	22,1(93,5)
	$t(s)$	1,5(1,1)	4,9(231,1)	4,2(161,7)	4,5(105,1)	4,0(14,9)	4,2(59,3)	1,7(1,8)	3,4(23,6)	5,1(210,2)	5,6(163,1)
Ag	$\bar{x}(\bar{x})$	65,3(68,1)	77,9(104,4)	53,0(58,4)	78,5(89,7)	42,6(47,0)	72,0(81,5)	39,1(46,4)	87,8(152,9)	81,0(122,0)	84,9(115,1)
	$t(s)$	1,4(19,9)	1,9(145,4)	1,6(22,7)	1,7(52,4)	1,6(23,4)	1,7(39,0)	1,9(29,7)	2,6(244,6)	2,1(193,1)	2,1(122,3)
	$r$	0,43	<b>0,44</b>	0,36	<b>0,33</b>	-0,10	-0,05	-0,70	-0,03	<b>0,50</b>	0,24
	Au/Ag	0,03	0,09	0,08	0,10	0,068	0,08	0,077	0,058	0,19	0,26
Hg	$\bar{x}(\bar{x})$	43,9(60,2)	39,2(54,0)	39,3(50,1)	34,8(58,1)	30,5(39,4)	28,2(40,6)	48,7(52,2)	49,2(75,0)	17,6(46,5)	13,2(22,1)
	$t(s)$	2,5(42,9)	2,4(37,7)	2,1(30,0)	3,7(47,7)	2,4(26,5)	2,8(30,6)	1,5(22,8)	3,1(67,4)	5,4(80,8)	3,8(16,5)
	$r$	-0,12	-0,17	0,25	-0,16	-0,62	-0,08	0,30	0,30	-0,05	-0,08
	Au/Hg	0,05	0,19	0,10	0,22	0,09	0,20	0,05	0,10	0,91	1,67
As	$\bar{x}(\bar{x})$	10(10)	34(327)	14(21)	39(135)	12(14)	29(94)	18(48)	67(904)	71(102)	48(77)
	$t(s)$	1(0)	5,6(1345)	2,1(24)	4,3(285)	1,6(9)	3,6(219)	3,8(85)	9,4(2288)	2,4(93)	2,6(94)
	$r$	0,0	<b>0,38</b>	0,17	<b>0,21</b>	-0,54	0,30	0,71	<b>0,42</b>	0,08	-0,04
Cu	$\bar{x}(\bar{x})$	56(57)	39(46)	37(44)	40(46)	46(48)	39(46)	37(44)	40(46)	19(28)	23(31)
	$t(s)$	1,2(11)	2,0(20)	2,0(19)	1,9(19)	1,3(13)	1,9(22)	2,1(21)	1,9(17)	2,6(23)	2,3(20)
	$r$	0,15	<b>-0,41</b>	<b>0,55</b>	0,18	-0,50	-0,10	0,15	-0,23	0,24	-0,05
Pb	$\bar{x}(\bar{x})$	12(12)	14(17)	12(13)	13(16)	12(13)	14(15)	10(10)	15(19)	10(22)	8(11)
	$t(s)$	1,4(4)	1,8(14)	1,4(5)	1,8(13)	1,4(4)	1,5(9)	1(0)	1,8(19)	2,4(55)	2,1(11)
	$r$	0,05	-0,05	0,16	-0,10	-0,29	-0,34	0	-0,24	0,24	<b>-0,53</b>
Zn	$\bar{x}(\bar{x})$	100(104)	103(121)	127(144)	103(117)	121(132)	137(163)	94(104)	124(139)	99(109)	83(84)
	$t(s)$	1,4(38)	1,8(74)	1,7(78)	1,6(64)	1,6(63)	1,8(106)	1,6(57)	1,6(71)	1,5(55)	1,2(14)
	$r$	-0,29	-0,26	0,22	0,10	-0,81	-0,21	0,05	-0,01	0,12	0,17
Ni	$\bar{x}(\bar{x})$	20(22)	23(27)	22(26)	22(26)	22(26)	18(23)	22(24)	22(24)	47(58)	38(88)
	$t(s)$	1,6(10)	1,8(12)	1,9(11)	1,9(11)	2(15)	2,1(13)	1,7(11)	1,6(10)	1,8(50)	2,6(228)
	$r$	-0,29	-0,03	0,32	0,14	-0,16	-0,01	0,36	0,10	<b>0,36</b>	0,17
Co	$\bar{x}(\bar{x})$	8(9)	9(11)	9(10)	9(11)	8(8)	7(8)	7(7)	7(8)	7(8)	7(7)
	$t(s)$	1,6(5)	1,8(7)	1,7(6)	1,9(9)	1,4(2)	1,6(4)	1,4(3)	1,6(4)	1,4(3)	1,3(2)
	$r$	-0,60	-0,22	0,20	0,04	-0,34	-0,17	0,47	0,18	0,16	-0,08

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4:  $\bar{x}(\bar{x})$  – среднее соответственно геометрическое и арифметическое содержание Au, Ag, Hg, мг/т, цветных металлов г/т;  $t$  – стандартный множитель;  $s$  – стандартное отклонение содержаний Au, Ag, Hg, мг/т, цветных металлов, г/т;  $r$  – коэффициент парной линейной корреляции элементов с золотом; выше уровня значимости обозначен жирным шрифтом

вается положительная корреляционная связь между золотом и серебром, отсутствующая в породах под и над рудным телом, заметно увеличены Au/Ag-, Au/Hg- и Au/As-отношения. В надрудном пространстве втрое увеличиваются концентрации ртути и сохраняется свойственная рудному уровню высокая степень распределения мышьяка при заметном снижении здесь его содержания до значений, сопоставимых с таковыми на подрудном уровне. Параметры распределения других металлов так же индифферентны, как и в полном разрезе метасоматического ореола. Обратную зависимость в распределении золота, с одной стороны, и ряда цветных металлов (Cu, Pb, Zn, Co), с другой, в породах на подрудном уровне демонстрируют значимые коэффициенты корреляции между ними.

Использование сравнительно с предыдущими результатами большего на порядок числа и иначе отобранных (секционных) проб (табл. 4) обусловило иные параметры распределения Au, Ag, As (ртуть не анализировалась), но обеспечило сохранение выявленного зонального в вертикальном диапазоне порядка геохимической зональности и индифферентное «поведение» цветных металлов – Cu, Pb, Zn, Co

без обогащения пород на рудном уровне никелем. Первое выражается в значительно более высоких содержаниях и дисперсиях распределения ведущих металлов, второе – в резком возрастании этих показателей на рудном уровне. Повторяется увеличение на рудном уровне Au/Ag- и Au/As-отношений.

## 5. Обсуждение результатов и выводы

Месторождение представляет тот случай почти горизонтального залегания мощной минерализованной зоны разуплотнения пород, в которой рудой служат метасоматически измененные углеродистые терригенные сланцы, насыщенные жильно-прожилково-вкрапленной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Крупнообъемный метасоматический ореол далеко выходит во всех направлениях за пределы определяемых кондиционными показателями контуров рудной залежи, сохраняя в обрамлении рудного тела основные черты своего состава и строения, но отличаясь лишь меньшей примесью рудообразующих (продуктивных) минеральных комплексов. Поэтому ореол квалифицирован не только как околорудный, но и



**Таблица 3.** Оценка параметров распределения рудогенных элементов и корреляционных связей золота с рудогенными элементами в гидротермально измененных породах углеродистой зоны рудовмещающего метасоматического ореола на различных уровнях (по данным штучного опробования)

Элементы	Параметры распределения	Уровни (число проб)		
		Подрудный (19)	Рудный (56)	Нарудный (32)
Au	$\bar{x}_2(\bar{x})$	5,4(25,7)	41,5(140,7)	7,1(13,4)
	$\sigma(s)$	4,4(63,8)	4,9(263,7)	2,5(25,6)
Ag	$\bar{x}_2(\bar{x})$	65,1(70,1)	113,6(180,8)	63,2(75,7)
	$\sigma(s)$	1,5(28,4)	2,3(256,6)	1,9(49,1)
	$r$	0,23	<b>0,49</b>	0,27
	Au/Ag	0,083	0,36	0,11
Hg	$\bar{x}_2(\bar{x})$	15,5(41,6)	13,1(30,8)	40,4(54,7)
	$\sigma(s)$	5,5(55,4)	4,9(34,1)	2,7(36,3)
	$r$	0,05	0,07	0,06
	Au/Hg	0,35	3,2	0,17
As	$\bar{x}_2(\bar{x})$	44(158)	118(390)	38(303)
	$\sigma(s)$	3,7(451)	3,8(1336)	4,1(1406)
	$r$	<b>0,53</b>	0,15	0,09
	Au/As	0,00011	0,00034	0,00019
Cu	$\bar{x}_2(\bar{x})$	33(44)	31(38)	30(40)
	$\sigma(s)$	2,5(25)	2,2(20)	2,5(24)
	$r$	<b>-0,60</b>	0,07	0,05
Pb	$\bar{x}_2(\bar{x})$	10(12)	12(22)	12(14)
	$\sigma(s)$	1,9(8)	2,2(47)	1,6(12)
	$r$	<b>-0,51</b>	0,05	-0,02
Zn	$\bar{x}_2(\bar{x})$	133(157)	103(120)	103(117)
	$\sigma(s)$	1,8(95)	1,7(78)	1,6(64)
	$r$	<b>-0,65</b>	0,16	-0,23
Ni	$\bar{x}_2(\bar{x})$	29(42)	41(62)	29(32)
	$\sigma(s)$	2,1(63)	2,0(131)	1,6(12)
	$r$	-0,28	0,07	0,28
Co	$\bar{x}_2(\bar{x})$	8(10)	8(10)	8(9)
	$\sigma(s)$	1,8(8)	1,7(8)	1,7(5)
	$r$	<b>-0,47</b>	0,16	-0,15

**Таблица 4.** Оценка параметров распределения рудогенных элементов в гидротермально измененных породах углеродистой зоны рудовмещающего метасоматического ореола на различных уровнях (по данным секционного сколового опробования)

Элементы	Параметры распределения	Уровни (число проб)		
		Подрудный (162)	Рудный (440)	Нарудный (289)
Au	$\bar{x}_2(\bar{x})$	50,0(208,8)	759,2(1505,3)	11,0(159,1)
	$\sigma(s)$	9,4(390,6)	5,4(3655,2)	13,3(661,9)
Ag	$\bar{x}_2(\bar{x})$	130,5(187,2)	175,1(277,4)	119,7(245,5)
	$\sigma(s)$	2,0(267,2)	2,3(475,2)	1,8(1763,4)
	Au/Ag	0,38	4,00	0,08
As	$\bar{x}_2(\bar{x})$	80(602)	436(1447)	40(118)
	$\sigma(s)$	5,0(1817)	5,2(2470)	3,0(516)
	Au/As	0,0006	0,0018	0,00025
Cu	$\bar{x}_2(\bar{x})$	44(47)	48(52)	46(49)
	$\sigma(s)$	1,5(13)	1,5(18)	1,5(13)
Pb	$\bar{x}_2(\bar{x})$	15(26)	19(28)	16(37)
	$\sigma(s)$	2,1(75)	2,1(54)	2,0(294)
Zn	$\bar{x}_2(\bar{x})$	116(139)	132(152)	133(170)
	$\sigma(s)$	1,7(96)	1,7(91)	1,7(356)
Ni	$\bar{x}_2(\bar{x})$	24(28)	30(34)	26(27)
	$\sigma(s)$	1,7(24)	1,6(48)	1,5(10)
Co	$\bar{x}_2(\bar{x})$	7(7)	8(8)	6(7)
	$\sigma(s)$	1,4(4)	1,5(4)	1,5(3)

рудовмещающий, в котором нет обычной для жильных месторождений осевой зоны в форме рудной кварцевой жилы. Тем не менее, ореол месторождения Чертово Кормыто обладает минеральной зональностью — типовой для мезотермальных золоторудных месторождений с рудными телами в форме жил, штокверков, минерализованных зон, залежей, в обобщенном виде показанной в [2].

Маломощные тыловые зоны ореола, приуроченные к пологим межслоевым швам отдельности и рассланцевания осадочной толщи, многократно чередуются в разрезе и по литорали с более мощной промежуточной углеродистой зоной, образуя структуру «слоеного пирога». По составу минеральных новообразований тыловая зона отвечает березиту, периферийные — пропильту, а в целом ореол, как и в других месторождениях, представляет сочетание березитовой и пропильтовой метасоматических формаций. Вместе с тем, месторождение служит дополнительной иллюстрацией, отражающей генетическое единство однообразно устроенных метасоматических ореолов, образованных в кристаллическом субстрате и в углеродистых терригенных сланцевых толщах осадочных бассейнов.

Приведенные петрологические данные служат основой для формирования геохимических выборок двух уровней, суждения о распределении металлов в рудовмещающем метасоматическом ореоле месторождения и генетической реконструкции условий формирования наблюдаемого геохимического поля. Нижний уровень представляют виды осадочных пород, подвергшихся региональному метаморфизму в пределах одной амфибол-биотитовой зоны и едва затронутых метасоматизмом на дальней окраине крупнообъемного метасоматического ореола. Не измененных раннепротерозойских осадочных пород, как и в других районах, не сохранилось. Верхний уровень представляют те же виды осадочных метаморфизованных пород, в разной степени преобразованных при метасоматизме в соответствии с минеральной зональностью рудовмещающего метасоматического ореола.

Минимальные содержания золота на окраине метасоматического ореола (табл. 2) в сравнении со стандартом Геологической службы США и с последними оценками кларков золота в разных типах и видах пород, в частности, в слюдяных сланцах (1,1 мг/т) [7] и в целом в осадочных породах (1,0 мг/т) [8], близки к кларковым значениям. Отклонения возможны в связи с вариациями содержания элемента, как и других элементов, относительно среднего (кларка). Вместе с тем, даже относительно небольшое обогащение золотом против кларка всех пород (2...4 мг/т) при изохимическом процессе — метаморфизме в пределах одной минеральной зоны маловероятно, если не сказать более определенно. Маловероятно также, чтобы второе — вчетверо большее содержание металла представляло местный (региональный) кларк. Предпочтительно предположение о том, что в данных конкретных условиях глубокого «пропаривания» блока рудооб-

разования металлоносными горячими растворами золото незначительно мигрировало от раствороподводящего взброса и растворораспределяющих межслоевых швов расщеливания и на дальнюю периферию ореола, хотя и при минимальной степени изменений пород. Близки здесь к кларковым значениям содержания и других металлов.

Обогащение рядом металлов (Au, Ag, отчасти As и Ni) горных пород по мере усиления степени их метасоматической переработки (табл. 2) и на рудном уровне (табл. 3, 4) в сочетании с усилением неравномерности их распределения, возникновением положительной связи золота с серебром, увеличением Au/Ag-, Au/Hg-, Au/As-отношений свидетельствует о причинно-следственных связях современного геохимического облика пород с метасоматическими их преобразованиями, следовательно, — о генетической связи геохимического ореола с метасоматическим и об образовании того и другого в результате процесса рудообразования. Геохимический ореол при этом занимает меньший объем сравнительно с метасоматическим, вписывается в последний, поскольку стремительно снижаются содержания металлов в направлении окраины метасоматического ореола. Незначительное, до десятков мг/т, обогащение метасоматитов тыловых зон благородными металлами согласуется с общими низкими содержаниями их в рудах, редко превышающими десятков (Au), десятки (Ag) г/т.

Возрастание отношений Au с Ag, Hg, As объясняется преобладающим против них поступлением золота. Отсутствие в ореоле аномалий или слабо повышенные над кларками содержания ряда цветных металлов (Cu, Pb, Zn, Ni, Co), характерные для мезотермальных месторождений золота, обязано низким концентрациям соединений этих металлов в растворах и, как следствие, отложению собственных минеральных фаз их лишь эпизодически, — последние присутствуют в виде редкой вкрапленности. Свойственное другим мезотермальным золотым месторождениям накопление ртути в породах надрудного уровня хотя и слабо, но проявлено

и в обсуждаемом ореоле; в согласии с отсутствием аномалий вольфрама это оценивается как признак незначительного эрозионного среза рудного тела. Пониженное содержание мышьяка и ртути в массивных метасоматитах тыловых зон обусловлено, вероятно, низким общим содержанием в них наложенных сульфидов — носителей металлов вследствие слабой проницаемости пород здесь для металлоносных растворов в отличие от трещиноватых сланцев. В частности, наиболее высокие содержания мышьяка в углеродистой зоне, а не в тыловых, сочетаются с тем, что именно в ней сосредоточена основная масса арсенопирита. Контуры аномалий Au и As лишь частично совмещены в объеме рудомещающего метасоматического ореола, что отражает неустойчивые связи между металлами, подтверждаемые расчетами (табл. 2, 3).

Одинаковая направленность изменений геохимических показателей, полученных на основе автономного штучного опробования пород по видам и минеральным зонам метасоматического ореола (табл. 3) и секционного (валового) опробования рудомещающего субстрата с длиной секций до 3 м (табл. 4), подчеркивает достоверность расчетов, а, следовательно, и полученных результатов.

Приведенные новые материалы и выводы в полном объеме вписываются в систему разработанных ранее [1, 2 и др.] петролого-геохимических доказательств геолого-генетической однородности мезотермальных месторождений золота, образованных в черносланцевом субстрате, с одной стороны, и в иных (ультраметаморфических, магматических и др.) породах, с другой. В свою очередь, демонстрируемая повторяемость один к одному эмпирических фактов служит не только критерием достоверности результатов, но отражает и подтверждает сформулированные в [1, 2] закономерности формирования состава, строения метасоматических ореолов и геохимических полей в них, причинно-следственные связи между ними и место тех и других в консервативном мезотермальном рудообразующем процессе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучеренко И.В. К методике формирования выборок для расчета статистических параметров распределения и баланса химических элементов в околорудном пространстве гидротермальных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 2. — С. 23–30.
2. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические свидетельства геолого-генетической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черносланцевом и несланцевом субстрате // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 1. — С. 25–35.
3. Ляхович Т.Т. Зональность первичных ореолов золоторудных месторождений // Известия вузов. Геология и разведка. — 2004. — № 6. — С. 35–39.
4. Панфилов Р.В., Гетманский И.И. Разноранговые аномальные геохимические поля как отражение эволюции рудогенерирующей системы // Известия вузов. Геология и разведка. — 2004. — № 6. — С. 79–83.
5. Марданова Ж.П. Минералого-геохимические критерии прогноза и поисков золото-сульфидных руд на примере Гошинского месторождения, Азербайджан // Руды и металлы. — 2004. — № 6. — С. 27–34.
6. Кучеренко И.В. Петрогеохимические особенности рудообразования в сланцевых толщах // Разведка и охрана недр. — 1986. — № 12. — С. 24–28.
7. Аношин Г.Н. Золото в магматических горных породах. — Новосибирск: Наука, 1977. — 207 с.
8. Ярошевский А.А. Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия. — 2006. — № 1. — С. 54–62.

Поступила 15.01.2008 г.